

УДК 621.039.562

Способы регулирования полей энерговыделения больших энергетических реакторов

СЕЛИВЕРСТОВ Б. Н., РУДОВ Н. П., ВОСКРЕСЕНСКИЙ Ф. Ф.

При эксплуатации большого энергетического реактора необходимо поддерживать определенную форму поля энерговыделения, так как деформация его может привести к аварийным ситуациям. Чувствительность поля энерговыделения к деформации, к локальным изменениям физических характеристик активной зоны возрастает с размерами реакторов и выравниванием потока нейтронов. Классические системы автоматического регулирования интегральной мощности не в состоянии компенсировать локальные всплески энерговыделения*. Поэтому для сохранения заданного профиля энерговыделения и устранения его локальных всплесков необходима специальная автоматическая система.

В настоящее время применяется способ поддержания оператором заданного распределения энерговыделения при помощи стержней вручную регулирования. Однако в связи с возрастанием требований к качеству поддержания заданного профиля энерговыделения и сложностью задач, возлагаемых на оператора, задача автоматизации управления распределением энерговыделения становится актуальной.

При разработке системы регулирования пространственного энерговыделения необходимо учитывать технологическую специфику эксплуатации реактора, а также структуру внутреннего механизма обратных связей, которая определяет предрасположенность рассматриваемого реактора к пространственным неустойчивостям энерговыделения.

Под технологической спецификой эксплуатации реактора подразумевается в первую очередь его целевое назначение, режимы перегрузки и загрузки ТВЭЛов.

При эксплуатации больших энергетических реакторов канального типа наблюдается тенденция перегрузки «на ходу», означающая, что выгоревшее горючее заменяется свежим без снижения мощности и остановки реактора. Это положительно сказывается на экономичности АЭС. Поэтому перед проектировщиком системы

управления пространственным распределением энерговыделения стоит вполне определенная задача, поскольку место, величина возмущения и его скорость уже заданы.

Другие задачи связаны со стабилизацией пространственных колебаний полей энерговыделения, вызванных взаимодействием нейтронно-физических и теплотехнических процессов. В этом случае специфика системы управления определяется характерной частотой пространственных колебаний полей энерговыделения. Обычно различают низкочастотные ксеноновые колебания, период которых колеблется от десяти до нескольких часов, и высокочастотные, свойственные большим кипящим реакторам с положительной обратной связью по паросодержанию. Здесь период пространственных колебаний может составлять секунды.

Следует отметить, что причина перекосов полей энерговыделения реактора может определяться не только склонностью рассматриваемого реактора к различного рода неустойчивостям, но и возможными аномалиями технологического характера, например перераспределением расхода и входных температур теплоносителя по топливным каналам и т. п. Наиболее сложным вариантом, естественно, является тот случай, когда реактор обладает всеми отмеченными динамическими характеристиками и к тому же требует непрерывной перегрузки горючего «на ходу».

Рассмотрим некоторые схемы регулирования полей энерговыделения, применяемые на современных энергетических реакторах. Эффективность этих схем можно продемонстрировать на двумерной сеточной модели гипотетического реактора без обратных связей с шестиугольной сеткой ячеек, для которого отношение квадрата диаметра к площади миграции равно $2,5 \cdot 10^3$.

В пределах зоны плато вносились локальные возмущения коэффициента размножения нейтронов ΔK_∞ , моделирующие замену выгоревшего ТВЭЛ на свежий*. При моделировании

* Здесь под классической схемой регулирования подразумевается многостержневая, синхронно связанная, система регулирования, работающая по среднему сигналу тока периферийных ионизационных камер.

* Для получения наглядных результатов предполагалось, что локальное возмущение ΔK_∞ составляет 10β , где β — эффективная доля запаздывающих нейтронов.

ионизационных камер, расположенных вне активной зоны, предполагалось, что вклад потока нейтронов в показания камеры от ячеек, отстоящих от нее на расстоянии r , определяется законом $\varphi = \frac{1}{r^2} \exp\left(-\frac{\xi}{r}\right)$, где значение ξ характеризует ослабление сигнала*. Таким образом, на каждую ионизационную камеру поступает сигнал, пропорциональный $\sum_{i=1}^N \varphi_i$, где N — число ячеек активной зоны реактора.

При больших значениях ξ , что соответствует реальному случаю больших, не «жесткосвязанных» активных зон, поток нейтронов центральных ячеек практически не участвует в формировании сигнала на регулятор интегральной мощности. Очевидно, поддерживая интегральную мощность реактора постоянной, «классический» регулятор не будет устранять локальные всплески энерговыделения, особенно в случае расположения зоны возмущения вдали от стержней регулятора. На рис. 1 приведена эпюра отклонений энерговыделения с использованием наиболее традиционной, так называемой «классической» схемы регулирования интегральной мощности реактора. Структурная схема регулятора интегральной мощности приведена на рис. 2.

Рассмотрим некоторые усовершенствованные схемы регулирования интегральной мощности с использованием периферийных ионизационных камер.

Система регулирования интегральной мощности реактора с подключением компенсирующих стержней КС [1]. Подключение выбранного числа стержней компенсации (см. рис. 2) происходит по сигналу от промежуточных концевиков регулятора. После того как стержни автоматического регулятора входят в зону действия концевых выключателей, выбранные стержни компенсации перемещаются с постоянной скоростью до тех пор, пока стержни автоматического регулятора вновь выйдут из зоны действия концевиков.

Основные параметры такой системы — число подключаемых стержней компенсации и зона нечувствительности ΔL этих стержней. При выборе зоны нечувствительности компенсирующих стержней приходится идти на компромисс, поскольку уменьшение рассматриваемой зоны ΔL приводит к некоторому улучшению эпюр

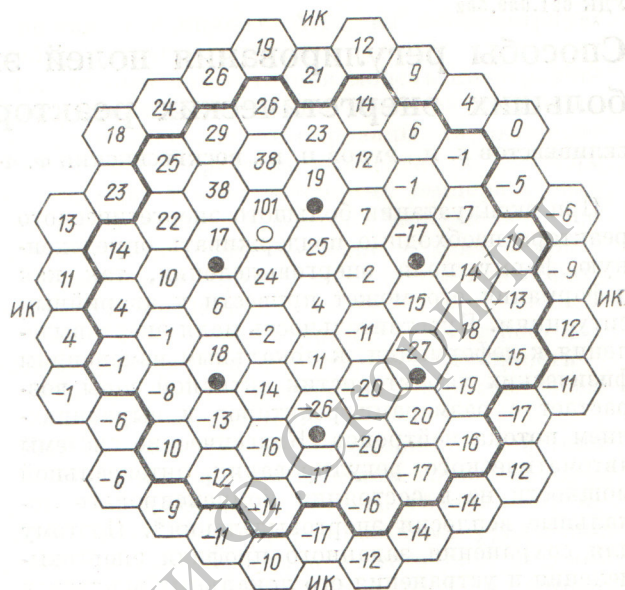


Рис. 1. Эпюра отклонений энерговыделения от номинального распределения при подавлении возмущения регулятором интегральной мощности:

● — стержни регулятора; ○ — вводимое возмущение; ИК — ионизационная камера; — — — отделение зоны плато от периферийной зоны

энерговыделения, но ухудшает условие устойчивости, которое в линейном приближении состоит в выполнении неравенства

$$\frac{1}{\lambda} + \frac{1}{K_{КС}q} > \frac{1}{K_{рег}},$$

где λ — усредненная постоянная распада запаздывающих нейтронов; q — коэффициент гармонической линейаризации, убывающий с ростом зоны нечувствительности ΔL ; $K_{КС}$, $K_{рег}$ — коэффициенты усиления системы компенсации и регулятора соответственно.

Выбор числа КС в первую очередь определяется компенсирующей способностью, а также их расположением относительно перегру-

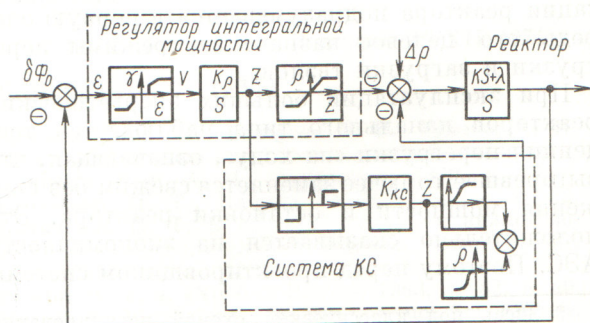
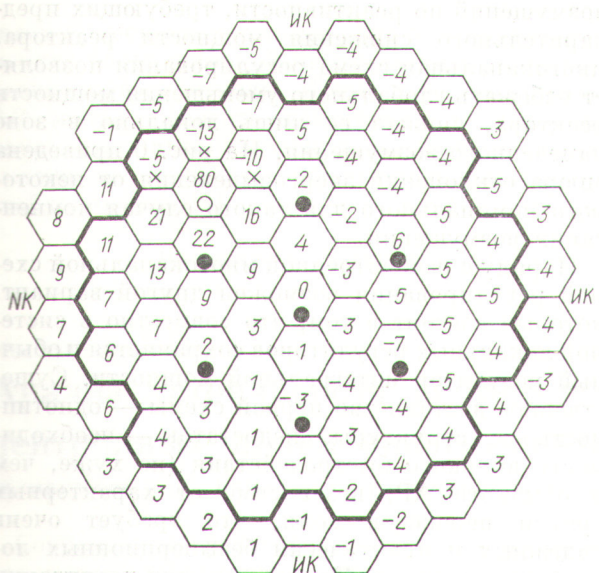


Рис. 2. Блок-схема регулятора интегральной мощности и структурная схема системы регулирования с подключением компенсирующих стержней

* Выражение для φ является аппроксимацией экспериментально полученных соотношений.



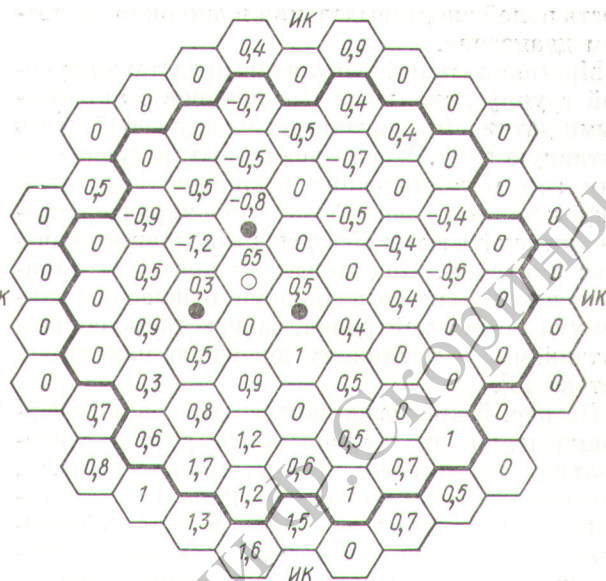
Р и с. 3. Эпюра отклонений энерговыделения от некоторого номинального распределения при подавлении возмущения с помощью регулятора интегральной мощности с тремя подключенными компенсирующими стержнями:

х — компенсирующие стержни (остальные обозначения, как на рис. 1)

жаемого твэла. Лучшим вариантом является такой, когда возмущение локализуется близ расположенными стержнями компенсации. При этом следует выполнять условия ядерной безопасности, поскольку вариация большого числа поглотителей в случае отказов может привести к аварийным ситуациям. На рис. 3 показано распределение отклонений энерговыделения при подавлении возмущения с помощью регулятора интегральной мощности с тремя подключенными стержнями компенсации.

Нетрудно увидеть, что увеличение максимума локального всплеска энерговыделения не произойдет, если проводить одновременно несколько подобных перегрузок, правильно организовав систему компенсации. При этом необходимо, чтобы расстояние между точками возмущения было более пяти длин миграции.

Система регулирования интегральной мощности с переменным расположением регулирующих стержней. При компенсации возмущения в предыдущей схеме жестко зафиксированное расположение стержней автоматического регулятора при асимметричных возмущениях относительно центра активной зоны приводит к повышенной неравномерности распределения энерговыделения вдали от места возмущения. Улучшить распределение энерговыделения по пространству активной зоны можно,



Р и с. 4. Эпюра отклонений энерговыделения от некоторого номинального распределения при подавлении возмущения регулятором интегральной мощности с переменной структурой расположения стержней регулирования (обозначения, как на рис. 1)

если компенсирующие стержни в районе заменяемого горючего будут работать в режиме автоматического регулятора. На рис. 4 приведена эпюра отклонения энерговыделения для такого способа регулирования. Как видно из рис. 4, по всему пространству активной зоны, исключая, конечно, возмущенную область, отклонения энерговыделения находятся в пределах погрешности моделирующего устройства.

Кроме гибкости управления схема регулирования обладает лучшими динамическими характеристиками, что обеспечивает более благоприятное качество переходного режима по сравнению с релейным. Недостаток такой схемы определяется требованием повышенной надежности всех исполнительных средств и необходимостью при различной перегрузке использовать разные компенсирующие стержни.

Многоканальная система регулирования полей энерговыделения с использованием датчиков внутрореакторного контроля считается наиболее совершенной по сравнению с рассмотренными выше [2]. Она обеспечивает профиль энерговыделения в реакторе не только в режимах перегрузки твэлов, но и при непредвиденных эксплуатационных аномалиях. Кроме того, многоканальная система регулирования с развитой схемой внутрореакторных датчиков при правильно выбранных параметрах в состоянии стабилизировать пространственную неустойчи-

вость полей энерговыделения в широком частотном диапазоне.

Многоканальный регулятор представляет собой группу локальных регуляторов с автономными датчиками, связанных между собой через активную зону. Число локальных регуляторов или зон регулирования выбирают, учитывая диффузионные и теплофизические характеристики активной зоны и обеспечение заданного качества контроля. Под качеством контроля понимается минимально возможное отношение максимума потока нейтронов, зарегистрированного датчиками, к истинному значению максимума потока [3].

На рис. 5 приведена эпюра отклонений энерговыделения от стационарного при многоканальном регулировании. Как видно из рис. 5, рассматриваемая схема многоканального регулирования обладает не худшими характеристиками по поддержанию пространственного энерговыделения в сравнении с рассмотренными схемами и выгодно отличается от них свойством поддерживать требуемое распределение при незапланированных случайных возмущениях и всякого рода нестабильностях.

Другое важное преимущество многоканальной схемы регулирования состоит в том, что в случае больших запланированных локальных

возмущений по реактивности, требующих предварительного снижения мощности реактора, многоканальная схема регулирования позволяет избежать глобального уменьшения мощности реактора, снижая ее лишь локально в зоне намеченного возмущения. На рис. 6 приведена эпюра отклонений энерговыделения от некоторого номинального для такого случая компенсации возмущения.

Наряду с рассмотренной многоканальной схемой регулирования возможен другой вариант, который состоит в том, что совместно с системой локальных регуляторов сохраняется и обычный регулятор интегральной мощности. Существенное достоинство первой схемы — однотипность ее структуры, недостаток — необходимость высокого быстродействия (не хуже, чем у обычного АР) независимо от характерных времен перекосов поля, что требует очень надежных и практически безынерционных локальных датчиков. Кроме того, для реализации режимов перевода мощности нужно обеспечивать синхронизацию уставок каждого локального регулятора.

Преимущество структурных схем второго типа в том, что требуемое быстродействие подсистемы локального автоматического регулирования определяется фактическими характер-

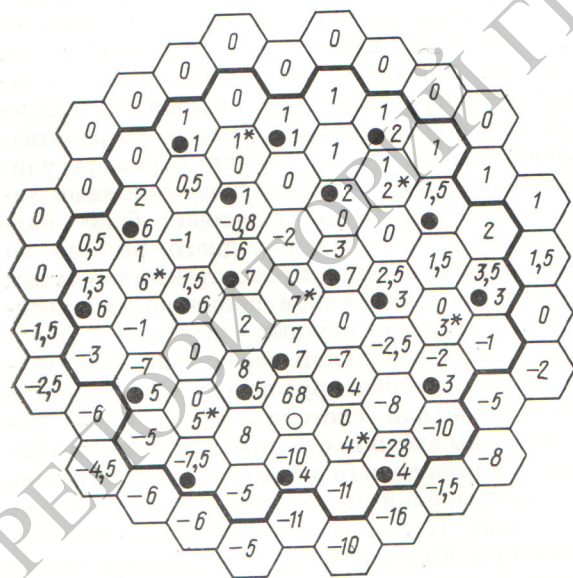


Рис. 5. Эпюра отклонений энерговыделения от некоторого номинального распределения при многоканальном подавлении возмущения:

● i — стержни локального регулятора, обслуживаемого i -й внутриреакторной камерой; i^* — камера внутриреакторного контроля для трех близлежащих стержней (остальные обозначения, как на рис. 1)

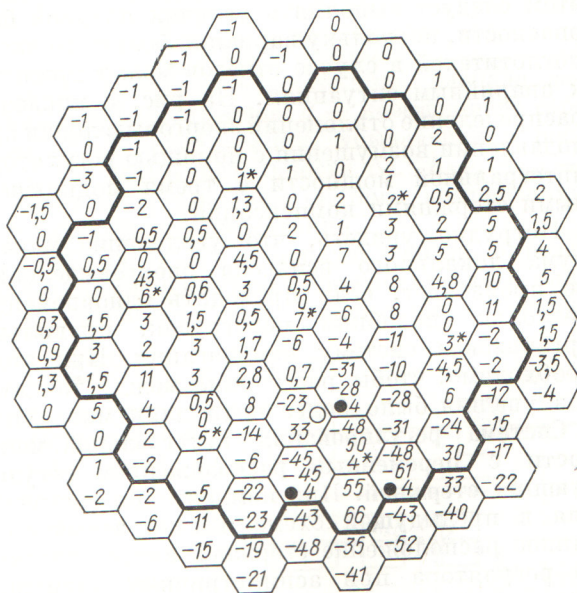


Рис. 6. Эпюра энерговыделения от некоторого номинального распределения при многоканальном подавлении возмущения с предварительным снижением мощности в зоне возмущения (верхние цифры соответствуют эпюре отклонений энерговыделения от номинального после снижения мощности в зоне действия четвертого регулятора, нижние цифры — после введения возмущения. Остальные обозначения, как на рис. 5)

время перекосов. Это позволяет применять более широкий набор датчиков внутриреакторного контроля. Кроме того, поскольку АР может работать независимо от системы локальных автоматических регуляторов, ее включение в работу может проводиться по необходимости [4].

Поступила в Редакцию 13/XII 1974 г.

УДК 621.039.512:621.039.562

Анализ устойчивости систем регулирования нейтронных полей энергетического реактора

СЕЛИВЕРСТОВ Б. Н., РУДОВ Н. П., ВОСКРЕСЕНСКИЙ Ф. Ф.

Современные реакторы большой мощности характеризуются значительными размерами активной зоны и высокой удельной мощностью единицы объема активной зоны. При эксплуатации реактора вследствие различных физических процессов нейтронное поле деформируется, что может привести к аварийным ситуациям.

Создание автоматических систем регулирования нейтронного поля повысит качество его поддержания, в значительной степени облегчит труд оператора, повысит безопасность и экономичность работы реактора в целом [1].

Одним из важнейших критериев работоспособности системы регулирования нейтронного поля является ее устойчивость. Эта проблема становится более актуальной при использовании инерционных датчиков внутриреакторного контроля.

Существует множество способов построения регулятора нейтронного поля. Простейший из них — группа локальных автоматических регуляторов (ЛАР), в которой каждый регулятор имеет свой датчик внутриреакторного контроля, сервопривод и стержень (группу стержней). В результате связи между потоками нейтронов активной зоны система регулирования принадлежит к классу многосвязных систем автоматического регулирования (МСАР) нейтронного поля.

Анализ работы МСАР связан с большими вычислениями вследствие высокого порядка дифференциального уравнения, описывающего динамику системы.

Существенно упростить запись уравнений можно при матричной форме записи и использовании матричных структурных схем (см. рисунок). На рисунке $\vec{W}_{об}$ — передаточная матрица

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Бовин А. П. и др. III Женевск. конф., 1964, докл. 28 (P)321.
2. Потапенко П. Т., Найдин Ю. И. В сб.: Управление ядерными энергетическими установками. Вып. 4. М., Атомиздат, 1970, с. 32.
3. Потапенко П. Т. «Атомная энергия», 1968, т. 24, вып. 4, с. 340.
4. Емельянов И. Я. «Изв. АН СССР. Энергетика и транспорт», 1974, № 3, с. 97.

объекта регулирования (реактора) размерностью $n \times n$ (здесь n — количество ЛАР); $\vec{W}_{рег}$ — передаточная матрица регулятора нейтронного поля в силу идентичности локальных регуляторов; $\delta\Phi$, ΔK , $\delta\Phi_0$ — векторы выходных переменных, возмущающих и задающих воздействие.

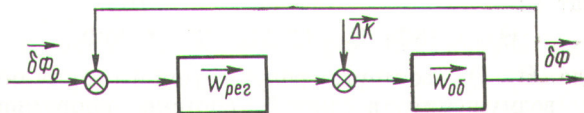
$$\vec{W}_{рег} = \vec{W}_{рег} \vec{E}, \quad (1)$$

где $\vec{E}$ — единичная матрица; $\vec{W}_{рег}$ — передаточная функция ЛАР.

Каждый элемент передаточной матрицы объекта характеризует передачу воздействий в линейной динамической системе и отражает зависимость каждого выхода системы от каждого из ее входов. Поскольку влияние возмущения в j -м канале регулирования на i -й канал равноценно влиянию i -го возмущения на j -й канал, матрица $\vec{W}_{об}$ будет симметричной.

Рассмотрим вид элементов передаточной матрицы реактора без мощностных обратных связей.

В первый момент после введения скачкообразного возмущения коэффициента размножения нейтронов происходит перераспределение потока нейтронов по активной зоне реактора за счет высших гармоник [2]. Этот процесс заканчивается за доли секунды, после чего устанавливается некоторый асимптотический период изменения потока нейтронов, который



Матричная структурная схема многосвязной системы автоматического регулирования нейтронного поля